

# 인덕형 多重모우드 光纖維에 伝送되는 光의 TNF 形態로부터 光파워 分布 및 定常狀態 側定

全永允 · 安鍾平 · 金容煥 / 光通信시스템研究室  
 朴熙甲 / 光素子研究室

## 〈Abstract〉

After the light from an incoherent LED was transmitted through the multimode fibers which were linked over 10 km, the near-field power distribution reached the steady-state independent of launching conditions. It has been also found that the steady-state output power distribution showed the pattern of Gaussian function. In this steady-state Gaussian function pattern, the measured losses of fibers were very repeatable values.

In case of using LD source, the speckle phenomena in near-field power distribution appeared until the distance of 10 km. And the output power distribution did not reach the steady-state shown in LED even over 20km on account of the coherence and the nonuniform lasing modes of LD. But the measured losses of fibers were nearly stable in this long distance.

## 〈요 약〉

비간섭성 LED 광원으로 부터의 빛이 다중모

우드 광섬유를 약 10km 이상 지났을 때 광의 입사조건에 무관하게 정상상태(Steady-state)에 이르며, 정상상태의 광섬유 출사단의 near-field 광 파워 분포가 가우시안(Gaussian) 함수 형태임을 알 수 있었다. 이 가우시안 함수형태의 정상상태에서 측정된 광섬유의 손실은 매우 안정된 측정치를 나타내었다.

한편 가간섭성 LD 광원을 사용할 경우 10km 까지 near-field 광 파워 분포에서 스펙클(Speckle) 현상을 볼 수 있었고, LD의 간섭성과 발광 모우드 형태의 불균일로 인하여 20km 이상까지 LED에서와 같은 정상상태에 이르지 않고 있었으나 이 상태에서 측정된 광섬유의 손실치는 비교적 안정하였다.

## I. 서 론

광통신에 사용되는 다중모우드 광섬유의 전송 특성은 광원과 입사조건에 따라 항상 산포가 있음이 알려져 있으며<sup>[1][2]</sup> 이러한 산포를 최소로 줄이기 위해 여러 측정 방식이 제안되어 왔다.<sup>[1][2]</sup> 특히 입사되는 광원의 모우드 파워(Power) 분포가 EMD(Equilibrium Mode Distribution)에 가깝고, 광섬유의 수광각 보다 큰 수광각을 가진 광원이 측정결과와 재현성을

위하여 가장 많이 사용되고 있다.<sup>[1][2]</sup> 이런 광원은 모우드 스크램블러나 모우드 필터를 사용하여 짧은 거리에서 쉽게 얻을 수 있으나 실제 측정 광섬유가 가지는 EMD와 다를 수 있으므로 광섬유의 고유 특성과의 오차를 갖지만 측정에 사용되는 광원이나 광섬유에 무관한 입사조건을 갖는 장점이 있다.

한편 광섬유 고유의 EMD는 광섬유에 입사된 광원이 전송되는 동안 모우드 전환(Mode conversion), 모우드 결합(Mode coupling) 및 광섬유 고유의 굴절률 분포에 따라 입사조건에 무관하게 일정한 파워 분포(EMD)를 하는 정상상태(Steady-state power distribution)<sup>[4][5]</sup>에 이른 광파워 분포로써, 이 상태에 이른 광원을 사용하여 광섬유의 전송 특성을 측정할 때 이러한 오차를 최소로 줄일 수 있을 것이며, 측정치도 일정한 값을 갖게 될 것이다. 그러나 긴 광섬유를 지난 정상상태의 광파워 분포는 사용되는 광원 및 광섬유의 종류에 따라 도달하는 거리가 다르고, 장거리가 요구되므로 제품 시험과정의 광원으로 사용되지 않고 있다. 그렇지만 다중 모우드 광통신 시스템 구성시 modal noise로 인한 정보 전송의 S/N비를 감소시키는 원인을 규명하고 보상하는 데 전송되는 광원의 광파워 분포형태를 분석 사용하고 있다.<sup>[17]</sup>

본 논문에서는 장거리 광통신 시스템에 사용되는 광원의 파워 분포 및 전송 특성의 측정에 타당한 정보를 제공하고, 유사 정상상태 광원으로<sup>[4][5]</sup> 인한 특성 측정치의 편차를 줄일 수 있도록 광원의 파워 분포형태를<sup>[18][19]</sup> 구하고자 한다. 광파워 분포는 입사 및 출사단의 far-field와 near-field 형태로<sup>[20][21][22]</sup> 측정하는 데, 여기서는 측정 시간이 짧고 측정이 편리하며 광섬유 굴절률 분포와 밀접한 관계가 있는 후자의 방법을 택하여 LED(Light Emission Diode)와 LD(Laser Diode)를 사용, 장거리 전송된 near-field 광파워 분포를 당연구실에서 개발한 TNF(Transmitted Near-Field) 광파워 측정 장치를 이용하여 측정하는 한편, 그 광파워 분포를 가우시안 또는 균일 분포함수에 최적 fitting하여 정상상태의 광파워 분포형태를 구하고자 한다. 그리고 장거리 전송된 빛을 사용, 손실을 측정함으로써 거리에 따른 광파워 분포와 측정된 손실변화를 비교하여 정상상태를 확인

하고자 한다.

## II. Near-field 파워 분포

TNF의 파워분포는 도파되는 빛의 세기와 광섬유의 굴절률 분포와 관계가 있다. 언덕형 다중 모우드 광섬유의 굴절률 분포는 광섬유의 반경함수로 다음과 같다.

$$n(r) = n_1 \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2}; r \leq a \quad \dots\dots (1)$$

$$= n_2; r \geq a$$

여기서  $n_1$ 은 코어의 최대 굴절률,  $n_2$ 는 클래딩의 굴절률,  $a$ 는 코어경,  $r$ 은  $0 \leq r \leq a$ 이며,  $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2$ 으로 상대 굴절률 차이이다.

모우드 분산이 최소가 되는 최적  $\alpha$ 는 1.9 ~ 2.1이내의 값으로 알려져 있으며,<sup>[10]</sup> 실험에 사용된 광섬유의  $\alpha$ 는 근사적으로 "2"였다.

광섬유 단면의 각 점의 near-field 파워는 그 점의 local 수광각(Numerical aperture)의 크기에 비례한다. 반경  $r$ 인 점의 local NA는

$$NA(r) = [n_1^2 - n^2(r)]^{1/2}$$

이다. (1)식으로 부터 위 식은

$$NA(r) = n_1 \cdot 2\Delta \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

같이 된다.

비간섭성 광원이 광섬유에 도파될 때 짧은 거리에서 near-field 광파워가 균일(Uniform)한 분포를 갖는다고 알려져 있다.<sup>[19][20]</sup> 이 분포함수에 따르는 near-field 광파워 분포는 (2) 식으로부터

$$P(r) \approx P(0) \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^\alpha \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

가 성립한다. 여기서  $P(0)$ 는 코어 중심의 최대 파워이다.

한편 장거리 전송되어 정상상태에 도달한 빛의 near-field 분포가 Gaussian 함수 형태라는 Miller의 가정<sup>[10]</sup>에 따르면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$P(0) \approx P(r) \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

광섬유에 입사된 빛은 광섬유를 지나는 동안 모우드들 간에 불균일한 상호작용(모우드 전환, 모우드 결합) 및 광섬유의 굴절률 분포 특성에 따라 도파되는 모우드 마다 전송특성이 다르게 나타난다. 따라서 장거리 도파되는 모우드 중 손실이 큰 모우드(대부분의 고차 모우드)들은 없어지고(radiation과 leaky 모우드), 손실이 작은 모우드들이 남게 되어 모우드간에 일정한 상

호각용만이 전송특성에 기여하게 되는 정상상태에 이른다.

이 정상상태의 광 분포도 어떤 일정한 분포를 하게 된다. 따라서 광섬유에 도파되는 빛의 near-field 파워분포 변화상태를 측정함으로써 정상상태에 이르렀는 지를 살펴볼 수 있으며, 식 (3)과 (4)를 사용하여 광파워 분포형태를 알 수 있을 것이다.

### III. 실험장치 및 방법

#### 1. 실험 장치

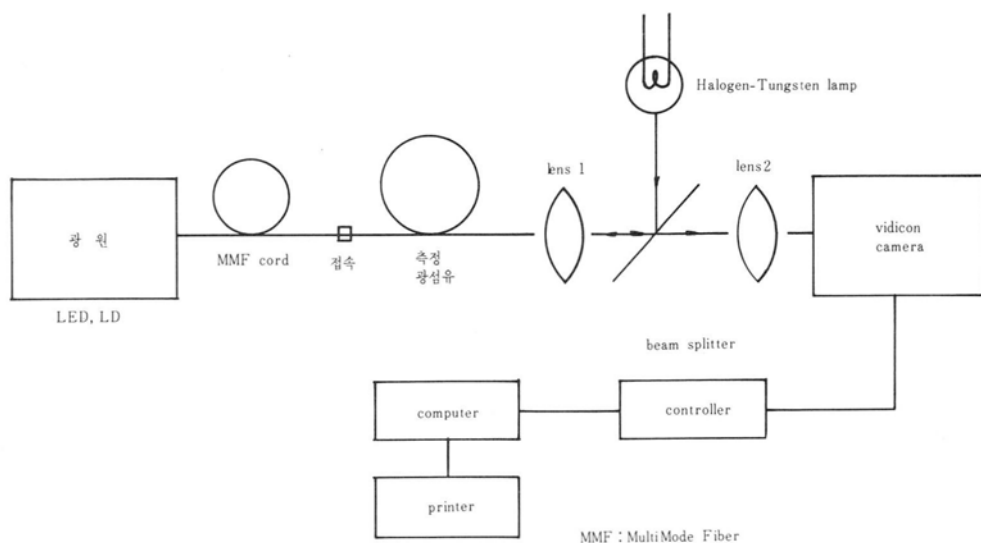
실험에 사용된 측정장치는 <그림 1>과 같다. 광원은 중심파장이  $1.3 \pm 0.125 \mu\text{m}$ 인 LED(일본 Anritsu사의 안정화된 광원),  $1.3 \pm 0.05 \mu\text{m}$ 인 LD(일본 NEC사의 BHD LD로 90Mb/s 시스템용 광원, CW로 발진)를 사용하였고, 측정용 광섬유의 구조와 같은 MMF 코오드(Cord)는 광원과 접속이 용이하도록 한 쪽은 커넥터(Connector)를 부착하였으며 다른 쪽은 측정용 광섬유와 용착 접속하였다. 코오드와 광섬유와의 접속 손실은 0.05dB 이하였고 코오드 길이는 약 1m였다. 사용된 샘플은 VAD(Vaper Axial Deposition) 방법으로 제조된 10개와 MCVD(Modified Chemical Vaper Deposition) 방법

으로 제조된 2개로써 길이는 모두 2km (앞의 10개중 1개는 1km), 손실은 0.8dB/km 이하, 대역폭은 900MHz/km 이상인 비교적 우수한 다중 모우드 광섬유였다. Halogen tungsten 램프는 광섬유 단면 조명용 광원이며, lens 1은 대물용, lens 2는 대안렌즈로써 후자는 near-field의 상을 크게하는 확대경이고, near-field 검출기는 일본 Hamamatsu 제품인 IR용 카메라이다.

한편 비디콘(Vidicon) 카메라는 1024(x-축), 1024(y-축)의 분해능을 가지고 있으며(본 실험에서는 1024 X 256을 사용), IR 카메라의 조절기와 연결된 컴퓨터는 HP 9836이며 파스칼(PASCAL)언어를 사용하였다. 또한 손실 측정용 검출기는 Ge-APD로 최소 -40dBm까지, 0.01dBm의 정밀도를 가진 일본 Anritsu제품을 사용하였다.

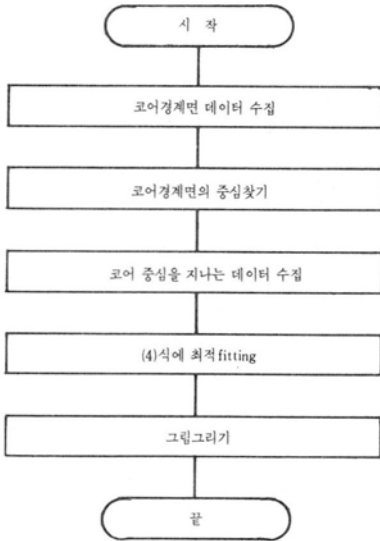
#### 2. 측정방법

샘플을 모두 용착 접속하여 안정화된 광원을 입사시킨 다음, 전 길이를 지나온 near-field 형태를 측정하고, 기준 광섬유 앞단의 샘플을 잘라내고 다시 기준 광섬유를 용착 접속한 후 전송된 near-field 형태를 측정하였다. 이런 방법으로 계속 앞단의 광섬유를 잘라내고 기준이 되



<그림 1> 실험장치 개략도

는 광섬유를 연결, 반복 측정하였다. 이때 접속 손실이 0.1dB 이하가 되도록 하였고, 실험중 입사광선을 고정시켜 측정에 영향을 받지 않도록 하였으며, 절단된 광섬유 단면을 halogen-tungsten 램프로 조사, 반사된 near-field를 관찰하여 단면의 절단 상태의 불량률을 비디콘으로 판별하여 재절단하였다. lens 2에 의해 확대된 상을 비디콘의 중심에 오도록 하고, 카메라 조절기와 연결된 HP9836 컴퓨터로 상의 데이터를 가지고 다음 과정을 수행하였다.



비디콘내의 광섬유 출사단 상의 강도 분포의 x축상에 해당하는 y데이터를 scanning 하면서 최대 강도를 찾고, 그 최대치의 5%인 코어 경계면 데이터를 수집하였다. 각 x축상 데이터는 잡음을 줄이기 위해 10번 평균하였다. 코어 경계면인 원의 중심을 지나는 y 데이터 (256개, 30번 평균하였음)를 취하여 아래와 같은 방식으로 curve fitting하였다.

식(4)를 규격화(최대파워에 대해) 하고 각 계수를 A, B라 하면

$$Y_1 = [A - B X_1^2]^2 \dots\dots\dots (5)$$

$Y_1$  : digitized 강도 ( $0 \leq Y_1 \leq 1$ )

$X_1$  : digitized 반경 ( $0 \leq X_1 \leq 1$ )

가 될 것이며 error function은

$$E = \sum (Y_1 - (A + BX_1^2))^2 \dots\dots\dots (6)$$

으로부터 "E"가 최소가 되는 A, B를 구하였다. 이 때 ( $X_1, Y_1$ ) 데이터는 파워 분포의 10~90% 이내 60~70개의 양자화된 데이터를 사용하였고, 모든 데이터를 식(7)에 대입 the index of determination ( $R$ )<sup>(6)</sup>를 구하여 fitting의 신뢰도를 판정하였다.

$$R(g) = \frac{\sum (g(X_1) - \bar{Y})^2}{\sum (Y_1 - \bar{Y})^2} \dots\dots\dots (7)$$

여기서

$R(g)$  : the index of determination

$g(X)$  : fitting된 곡선의 방정식

$\bar{Y} = (1/N) \sum Y_1$  (N은 취한 data점의 수)

이다.  $0 \leq R(g) \leq 1$ 로써 잘된 fitting은 "1"에 가깝다.

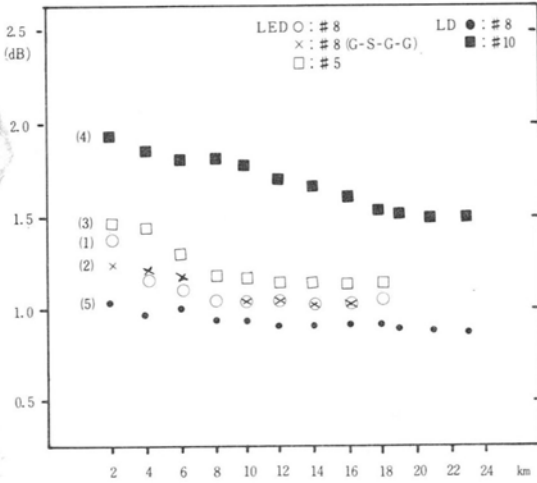
손실은 기준 샘플에 대한 각 구간마다 near-field 형태로 측정 한 후, 출력과 기준 샘플 앞단의 접속지점으로 부터 1~2m점을 입력으로 여러번 측정하였다.

모우드 스크램블러 (Mode scrambler) G-S-G-G (Graded-Step-Graded-Graded index) type을 입력단에 삽입하고, 다시 전 구간을 접속하여 위의 과정들을 수행하였다. LED를 광원을 하였을 때는 VAD로 제조된 18km (샘플 9개), LD로 측정할 때는 앞의 9개 중 8개와 VAD로 제조된 1개 (1km), MCVD로 제조된 2개 (4km)를 16~21km 구간에, 그리고 기준 샘플 (VAD로 제조된)을 끝단에 순서대로 연결하여 측정하였다.

#### IV. 측정결과 및 검토

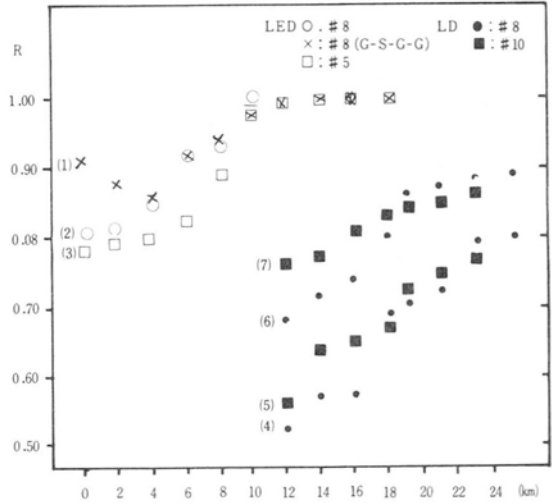
안정화된 광원을 입사시켜 # 5, # 8, # 10 (VAD로 제조된것)의 길이에 대한 파워 분포를 측정하였다. LED광원의 경우 10km 이상 지나서야 광파워 분포가 일정한 형태인 정상 상태에 도달하였다. 이 정상상태에 도달한 near-field의 파워 분포형태를 알아보기 위해 거리에 따른 각 광파워 분포를 Gaussian 함수에 fitting하여 그 함수에 대한 fitting의 타당성을 나타내는 R의 변화를 <그림 2>에 나타내었다.

<그림 2>의 곡선 (1)~(3)에서 보는 바와 같이 거리에 따라 R의 값이 증가하다가 10km 이상에서는 거의 "1"로써 일정치에 이르고 있다. 이것은 10km 이상에서 광파워 분포가 Gaussian



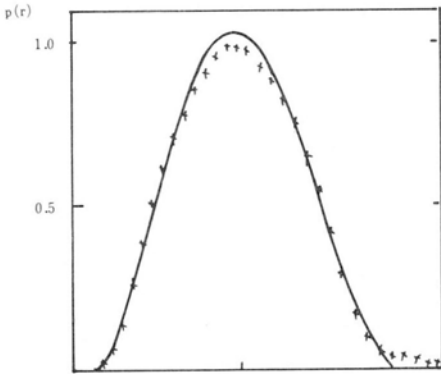
(1),(2),(3): LED 광원 (3),(4): LD 광원  
 (2)는 입사단에 G-S-G-G 모듈드 스크램블러 사용  
 샘플: 각 2km

〈그림 3〉 거리에 따른 손실 변화

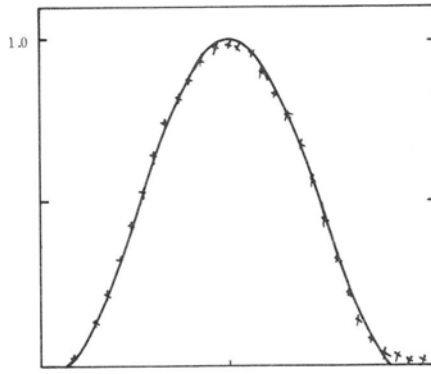


(1)~(3): LED 광원사용, (4)~(7): LD 광원사용  
 (1)~(5): Gaussian fitting, (6),(7): Uniform fitting  
 샘플: 각 2km

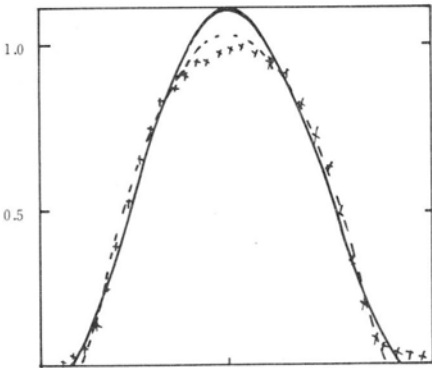
〈그림 2〉 각 점에서 측정된 R의 값



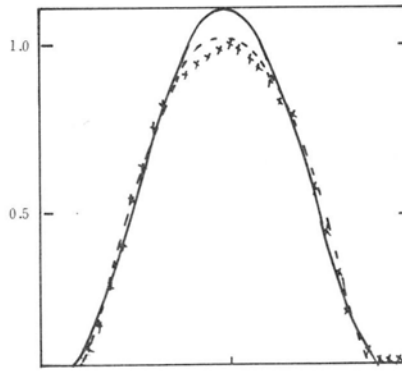
(a)



(b)



(c)



(d)

(a), (b): LED 광원으로 각각 8km와 12km 지점  
 (c), (d): LD 광원으로 각각 18km와 23km 지점  
 \*: 측정치, —: Gaussian fitting, ---: Uniform fitting

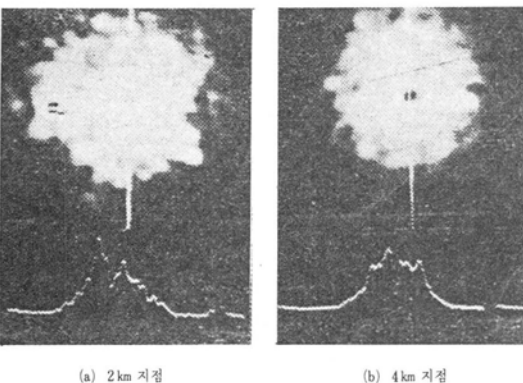
〈그림 4〉 코어 중심을 지나는 선의 near-field 파워 분포 (샘플 #8)

함수 형태로 일정함을 나타내며, 정상상태에 이른 near-field 광파워 분포는 Gaussian 함수임을 알 수 있다. 곡선 (2)는 (1), (3)과 달리 측정 광섬유 입사단에서 큰 값을 보여 주고 있는데 이는 500m의 G-S-G-G 모우드 스크램블러를 사용하였기 때문이다. 그러나 광섬유를 지나면서 모우드 스크램블러를 사용하지 않는 경우와 유사한 변화는 광섬유의 고유한 전송 및 기하구조 특성으로 정상상태에 이르는 거리가 입사광원의 조건에 의존하지 않고 일정함을 나타낸다.

〈그림 4〉의 (a)와 (b)는 8km와 12km 지점에서 샘플 # 8의 near-field 형태의 측정치와 Gaussian 함수로 fitting된 것으로써 위의 사실을 확인 할 수 있다.

〈그림 3〉은 전송된 빛을 사용하여 측정된 각 샘플의 손실 측정치로써 정상상태에 이르렀을 때 일정하며, 또한 재현성이 매우 좋음을 나타내고 있다. 정상상태에 이르지 않는 거리에서의 큰 손실치는 모우드간의 상호작용과 손실이 큰 고차 모우드들이 존재함을 알 수 있다.

가간섭성 LD광원이 다중모드 광섬유에 입사되었을 때 진행되는 동안 모우드간 위상차로 인해 간섭을 일으켜 near-field 강도분포가 〈그림 5〉와 같이 스펙클(Speckle) 형태가 되어 짧은 거리에서는 측정이 불가능하였다. 이러한 스펙클 현상이 10km까지 나타나고 있었다.



〈그림 5〉 LD 광원의 speckle 현상을 나타내는 near-field 파워 분포

〈그림 2〉의 (4), (5)에서 12km 이상에서 측정된 R이 LED의 경우 보다 현저하게 작을 뿐

아니라 20km 이상 전송되어도 Gaussian 함수인 정상상태에 이르지 않고 있다. 〈그림 4〉의 (c)와 (d)는 측정된 near-field 분포와 fitting된 것으로 〈그림 2〉에서와 같이 R이 0.8이하로써 Gaussian fitting 함수 자체와 관계가 매우 적은 것으로 나타나고 있다. 이것은 20km 근방까지 LD의 간섭성 또는 광원의 발진 특성이 유지되고 있음을 말한다.

한편 near-field 파워 분포를 식(3)을 사용하여 Gaussian fitting에서와 같은 방법으로 균일 분포에 fitting한 결과, R값의 변화가 〈그림 2〉의 (6), (7)에서와 같이 나타났으며, 20km 이상에서 R이 비교적 큰 것으로 보아 LD의 간섭성과 더불어 near-field 광파워 분포가 균일 분포에 가까와 지고 있음을 알 수 있다.

〈그림 3〉의 (4), (5)의 손실치는 스펙클 현상에 의해 거리에 따라 불규칙적으로 감소하다가 20km 근처에서는 비교적 안정하게 감소하고 있다. 그런데 (4)의 손실치가 (5)와 달리 거리에 따라 크게 감소하고 있는 것은 광섬유의 전송 특성이 좋지 않아 손실값의 변화가 크기 때문일 것이다.

한편 정상상태에 이르는 거리가 C.M.Miller<sup>(16)</sup>는 1~2km, CCITT G651<sup>(17)</sup>에 따르면 광섬유의 종류에 따라 5km 이상이라는 결과들은 사용되는 광섬유에 따라 정상상태에 이르는 거리가 다르다는 것을 알 수 있다. 실제적으로 정상상태 여부는 손실 측정치가 아닌 near-field 형태에 의해 결정되어야 한다. 따라서 〈그림 4〉의 (1)~(3)의 6~8km 사이의 손실이 정상상태의 값과 비슷하나 정상상태라고 볼 수 없을 것이다. 이것은 아직도 모우드간에 불균일한 상호 작용이 있음을 나타낼 것이다.

K. I. Sato<sup>(17)</sup> 등은 언덕형 다중 모우드 광섬유에 LD광원을 사용하였을 때 스펙클 현상이 광원 및 광섬유에 따라 1~5km까지 일어나고 있었다는데, 본 실험에서는 10km까지 존재하였다. 이것은 사용된 광섬유의 전송 특성이 매우 좋고, 광원의 발진 모우드가 불균일 하기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 이러한 스펙클 현상은 데이터 전송시 SNR를 감소시키는 스펙클 잡음 또는 modal noise라 불리우는데, LAN (Local Area Network)에 사용될 비디오 채널 로그 전송 시스템에서는 심각한 문제이나 여러

가지 보완방법이 개발되어 이용되고 있다.<sup>17)</sup>

따라서 LED 광원을 사용하는 시스템에서는 10km 근방에서 정상 상태에 이르므로 시스템 운용시 입사조건에 무관하게 전송 특성치의 오차가 작고 재현성이 좋을 것이므로 시스템 설계에 안정된 측정치를 제공해 줄 것이다. 그렇지만 LD를 사용하는 경우는 LD의 종류, 모드간 간섭 및 불균일한 발진 모드로 인한 스펙클 현상 때문에 20km 이하 무중계 LD 시스템을 운용 및 보전하는데 전송 특성치의 오차가 비교적 클 것으로 보이며, LD를 LAN 광원으로 사용할 때는 광파워 분포형태를 측정하여 스펙클 현상을 제거해야 하며, 이렇게 함으로써 대량 및 양질의 정보를 전송할 수 있을 것이다.

## V. 결 론

안정화된 LED와 LD 광원과 전송특성이 좋은 언덕형 다중 모드 광섬유를 사용하여 전송 거리에 따른 near-field 형태와 손실을 측정하여 정상상태의 광파워 분포형태를 구하였다.

1) LED를 광원으로 사용한 경우 사용된 모드 스크램블러와는 상관없이 정상상태의 광파워 분포에 이르는 광섬유의 길이가 일정 하였으며, 정상상태에 이르는 광섬유 단면의 near-field 광파워 분포는 Gaussian 함수형태로 나타남을 관찰하였다. 정상상태에 이르지 않은 광파워 분포를 Gaussian 함수형태로 fitting 하였을 때 그 신뢰도가 나쁜 반면 정상상태에서  $R=1$  로써 Gaussian 분포함을 확인하였다. 뿐만 아니라 LED 광을 장거리 전송시켜 이론 정상상태에서의 광섬유 손실 측정치는 매우 안정됨을 관찰하였다.

2) LD를 사용한 경우 광원의 가간섭 성으로 인해 10km 이상까지 스펙클 현상이 나타나고 있었으며, 20km 이상 전송이 되어도 LED와는 달리 Gaussian 분포하고 있지 않았지만 거의 균일 분포에 가까와 졌음을 알 수 있었다.

따라서 광원의 종류에 따라 광파워 분포가 다르고 일정한 광파워 분포를 얻는데 장거리가 요구되므로 Gaussian 분포하는 정상상태를 실현하기가 쉽지 않으나, 광통신 시스템 설계시 정상상태의 광원이 시스템 마아진 설정에 타당한

측정치 및 장거리 전송특성 측정치에 재현성을 줄 것이다. LD광원은 LD의 종류 및 불균일한 발진 모드로 인한 스펙클 현상이 장거리까지 유지되므로 대용량 애널로그 시스템 설계시 안정된 광파워 분포가 이루어 질 수 있도록 고려되어야 하며, 장거리 전송 특성치에도 위와 같은 현상때문에 측정오차가 항상 발생할 것으로 보인다.

## (参 考 文 献)

1. NBS, "Optical Fiber Characterization", NBS, Special Pub. 637, Vol. 1, 1982.
2. 전 영운 외, 다중모드 광섬유 특성의 비교측정, 한국통신학회 1985년 춘계학술발표회 논문집, 1985.
3. 강 민호 외, 장파장 광통신 시스템연구, 한국전자통신연구소 보고서, 1983.
4. CCITT COM XV-19-E, "Conditions for Measurement of Baseband Response of Multimode Fiber", Apr. 1985, p. 242.
5. Stone, F. T. "Launch Dependent Loss in Short Length of Graded-index Multimode Fiber", Apl. Optics, 17 (17), 1978, p. 28, 25.
6. CCITT COM XV-No.76-E, "A New Method for Realizing the Equilibrium Mode Distribution for Optical Attenuation Measurement", 1982, p. 964.
7. 이 상호, 강 민호, 박 한규, "광섬유 SGS 모드 스크램블러의 특성 해석에 관한연구", 대한전자공학회지, 21(1), 1984, p. 1.
8. CCITT G-651, 1984.
9. Marcuse, D., Theory of Dielectric Optical Waveguide, Chap. 5, Academic press, 1982.
10. Miller, C. M. & S. C. Mettler, "A Loss Model for Parabolic-profile Fiber Splicer", B. S. T. J., Vol. 57(9), p. 1978, 3167.
11. Daido, Y., E. Miyauchi & T. Iwama, "Measuring Fiber Connection Loss using Steady State Power Distribution: A Method" Apl. Optics, 23(3), 1981, p. 451.
12. Marcuse, D., "Excitation of Parabolic-index Fibers with Incoherent Source", B.S.T.J.

- 59(9), 1975, p. 1507.
13. Gloge, D. "Optical Power Flow in Multimode Fiber", B. S. T. J., 51(8), 1972, p.17, 67.
  14. Grau, G. K. & O. G. Leminger, "Relation between Near-Field and Far-Field Intensities, Radiance, and Modal Power Distribution of Multimode Fiber Graded-Index Fibers", Apl. Optics, 20(3), 1981, p. 457.
  15. Cherin, A. H., P. J. Rich, and S. C. Mettler, "Measurement of the Core Diameter of Multimode Graded-index Fiber: A Comparison of Transmitted Near-field and Index Profiling Techniques", J. of Light-wave Tec., LT-1(2), 1983, p. 302.
  16. Maron, Melvin J., Numerical Analysis, MacMillan Publishing Co., 1982.
  17. Sato, K. I. & K. Asatani, "Speckle Noise Reduction in Fiber Optic Analog Video Transmission using Semiconductor Laser Diode", IEEE Trans. on Comm., COM-29(7), 1981, p. 1017.
  18. K. I. White, "Practical Application of the Refracted Near-field Technique for the Measurement of Optical Fiber Refractive Index Profile", Opt. & Quantum Electronics, Vol. 11, 1979, p. 185.